

Europas Überschwemmungen in historischer Perspektive

Grosse Häufigkeitsschwankungen während der letzten 500 Jahre

Von This Rutishauser und Heinz Wanner*

Eine interdisziplinäre Analyse hat gezeigt, dass die Häufigkeit von Überschwemmungen in den letzten 500 Jahren stark variierte und trotz Klimaerwärmung kein klarer Trend sichtbar ist. Eine wichtige Rolle spielen beim Auftreten von Überschwemmungen langfristige Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation und der damit verbundene Feuchtetransport von Atlantik und Mittelmeer Richtung Europa.

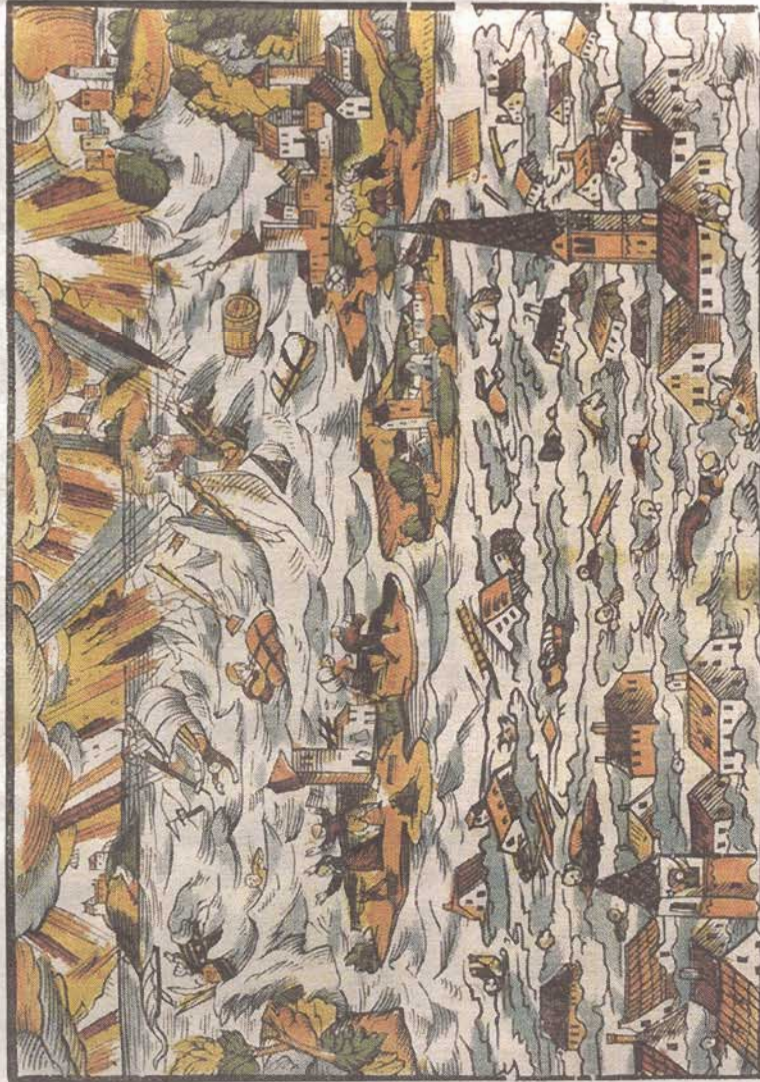


Illustration aus einer Flugschrift zu den Stürmen, Regenfällen und Hochwassern des Winters 1612/1613. (Die Flugschrift ist im Besitz des Gothaer Schlossmuseums.)

«Die Sommer-Sintflut» titelte der «Spiegel» im August 2002. Obwohl uns das Jahr 2003 einen Jahrtausendsummer mit Hitze und Trockenheit gebracht hatte, erinnern sich die meisten noch gut an die Hochglanz- und Fernsehbilder von vor zwei Jahren. Sie zeigten Flüsse, die ihr Bett verlassen hatten und ganze Landstriche in Deutschland, der Tschechischen Republik, Polen und Österreich unter Wasser setzten. Am 17. August hatte die Elbe in Dresden einen Pegelstand von

Wiederkehrperioden charakterisiert worden. Die Häufigkeitsanalysen konnten somit auf eine stark erweiterte Datengrundlage gestützt werden. Als extremes Hochwasser wurde eine Überschwemmung definiert, während deren ein Fluss deutlich über die Ufer tritt oder dessen Abflussmenge einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Bisher war die Schwere eines Ereignisses entweder aufgrund der angerichteten Schäden und der Zahl der Opfer oder mit Hilfe von

Die Rekonstruktion alter Daten

Im Projekt Floodrisk wurde eine breite Palette von historischen Dokumenten zur Rekonstruktion und Analyse von Hochwassern zwischen 1500 und 1800 mit historischen Methoden analysiert und mit Abflussmessungen der letzten 200 Jahre in Beziehung gebracht. Tagebücher, Chroniken, Reiseberichte, Steuerabrechnungen, Bilder und historische Landkarten enthielten ebenso Hinweise auf Überschwemmungen wie Hochwassermarkierungen an Gebäuden und Brücken. Die Quellen dokumentieren Verluste an Menschenleben sowie Sachschäden oder Auswirkungen auf die Wirtschaft. Auch mögliche Gründe für eine Flut wie Starkniederschläge oder intensive Schneeschmelze sind in manchen Dokumenten erwähnt.

Aus der Analyse der historischen Aufzeichnungen gingen drei Intensitätsklassen von Überschwemmungen hervor: kleine, regionale Überschwemmungen mit geringen Schäden; überregionale Überschwemmungen mit beschränkten Schäden an Brücken, Dämmen und Flussverbauungen und katastrophale Überschwemmungen mit schweren Schäden, menschlichen Opfern und anhaltenden Folgen während mindestens eines Jahres. Für die Jahrhunderte vor 1800 konnte mit Hilfe von analogen Schadenbildern aus historischen Quellen und klassierten, modernen Abflussmessungen das Ausmass der Fluten abgeschätzt werden. Zuvor waren in einem separaten Projekt des Berner Forschungsstands von Jürg Luterbacher mit Hilfe von indirekten Quellen wie Wetterbeschreibungen, Meeresverteilung, Baumringdaten oder frühesten instrumentellen Messungen die monatlichen Luftdruck- und Niederschlagskarten über Europa rekonstruiert worden. Damit konnten auch die einzelnen Wettermuster der grossen Überschwemmungen analysiert werden.

neben der Unterstützung durch die politischen Organe auch Medienkampagnen zugunsten der betroffenen Bevölkerung sehr erfolgreich waren. Ein gutes Katastrophenmanagement, eingesetzt und unterstützt durch die politischen Autoritäten, kann wesentlich zur nationalen Integration beitragen.

Offene Fragen und Hypothesen

Auch am Schluss dieser Studie gab es aber noch offene Fragen und wieder neue Hypothesen. Obschon von verschiedenen Experten betont wurde, dass Landnutzungsänderungen und Flusskorrekturen im Vergleich zur atmosphärischen Komponente eine weniger bedeutende Rolle spielen

temperaturen herrschte allerdings ein anderes Zirkulationsregime vor. Dieses ist bekannt als negativer Modus der sogenannten Nordatlantischen Oszillation (NAO). Dieser Modus, der durch abnormale hohe Abweichungen des Druckes über Nordeuropa vom langjährigen Mittelwert gekennzeichnet ist, bringt in der Regel vor allem dem Mittelmeerraum hohe Niederschläge. Eine Erklärung, weshalb es während des Maunder-Minimums häufig zu dieser Anomalie kam, gibt es noch nicht. Ab Mitte 1850 hat sodann ein weiteres Zirkulationsmuster vermehrt «ins Geschehen eingegriffen», nämlich häufige West-/Nordwestwetterlagen mit einer teilweisen Bildung von Zyklonen im durch die Alpen windgeschützten Bereich über Genua. Diese können in einer ersten Phase an den Alpen zu Niederschlagsstau und gewaltigen Schneemengen führen. Abgesehen von der Erzeugung verheerender Hochwasser waren diese Wetterlagen wohl auch für den dritten Vorstoss der Alpengletscher der Kleinen Eiszeit um 1860 mitverantwortlich. Als besonders markantes Katastrophenereignis ist im Alpenraum dabei das Herbsthochwasser von 1868 zu erwähnen.

Sozioökonomische und politische Folgen

Die am Projekt beteiligten Sozialwissenschaftler haben klar aufgezeigt, dass die Gesellschaft klimatologisch längerfristig in erster Linie Extremereignisse wahrnimmt. Die sozioökonomische Analyse von historischen Überschwemmungen konzentrierte sich deshalb im Rahmen von Floodrisk auf katastrophale Ereignisse der schwersten Klasse wie jenes vom Winter 1784. Sie zeigte, dass während oder kurz nach einem Hochwasser nebst der Zerstörung von Gebäuden und Infrastruktur vor allem die Nahrungsmittelproduktion betroffen war. Versorgungspässe für Menschen und Tiere waren die Folge. Die politischen Organe waren gezwungen, mehr oder weniger effizient das Alltagsleben wieder in Gang zu bringen, während die betroffene Bevölkerung verzweifelt und orientierungslos war und nach Informationen verlangte. Als erste Massnahme müssen die politischen Organe daher verhindern, dass ein gesellschaftliches Chaos entsteht. Die betroffene Bevölkerung braucht zudem schnell Informationen, wie die Katastrophe entstanden ist.

Wie der Berner Klimahistoriker Christian Pfis-



Illustration aus einer Flugschrift zu den Stürmen, Regenfällen und Hochwassern des Winters 1612/1613. (Die Flugschrift ist im Besitz des Gothaer Schlossmuseums.)

«Die Sommer-Sintflut» titelte der «Spiegel» im August 2002. Obwohl uns das Jahr 2003 einen Jahrtausendsummer mit Hitze und Trockenheit gebracht hatte, erinnern sich die meisten noch gut an die Hochglanz- und Fernsehbilder von vor zwei Jahren. Sie zeigten Flüsse, die ihr Bett verlassen hatten und ganze Landstriche in Deutschland, der Tschechischen Republik, Polen und Österreich unter Wasser setzten. Am 17. August hatte die Elbe in Dresden einen Pegelstand von 9,4 Metern erreicht, eine Marke, die sich bisher aus gesicherten historischen Quellen nicht nachweisen lässt. Noch während immer mehr Dämme zu brechen drohten und ganze Dörfer und Städte in den Fluten versanken, verlangte die Bevölkerung eine Klärung der Ursachen und die Suche nach möglichen Verantwortlichen.

Enorme Folgekosten

Letzten Sommer kamen die Überschwemmungsbilder nun nicht aus Europa, sondern aus den Monsungebieten Bangladeshs und Chinas und aus den Einzugsgebieten der Hurrikane in der Karibik. In der Schweiz näherten sich im Frühling die Seespiegel der Alpenrandsen jedoch bedrohlich dem Katastrophenpegel und liessen Erinnerungen an 1999 wach werden, als der Thunersee und im weiteren Verlauf die Aare Berner Mattequartier über die Ufer traten. Mehrere verheerende Überschwemmungen suchten allein in jüngster Vergangenheit auch die Gebiete um Rhein und Mosel (Dezember 1993 und Januar 1995), die Oder (Juli 1997 und 2001) sowie um Elbe und Donau (August 2002) heim. Diese Ereignisse werfen die Frage auf, ob sie die Folgen der normalen Variabilität des Klimas und eines natürlichen Klimawandels sind oder ob sie gar bereits auf menschliche Aktivitäten und Einflüsse auf das Klimasystem zurückzuführen sind.

Klar ist, dass die Folgekosten enorm sind: Allein die Jahrtausendflut von 2002 dürfte in Zentraleuropa zu Schäden von über 25 Milliarden Euro geführt haben. Weltweit besagen Schätzun-

gen. Die Häufigkeitsanalysen konnten somit auf eine stark erweiterte Datengrundlage gestützt werden. Als extremes Hochwasser wurde eine Überschwemmung definiert, während deren ein Fluss deutlich über die Ufer tritt oder dessen Abflussmenge einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Bisher war die Schwere eines Ereignisses entweder aufgrund der angerichteten Schäden und der Zahl der Opfer oder mit Hilfe von Wiederkehrperioden charakterisiert worden.

Für die Beschreibung der Überschwemmungen unterschied man in Floodrisk zudem zwischen den Voraussetzungen und den Auslösefaktoren. Fläche, Topographie und Landnutzung des Einzugsgebiets, die Sättigung des Bodens mit Wasser und die vorhandenen Speicher in Schnee und Eis bilden wichtige Voraussetzungen. Auf der Seite der Auslösefaktoren sind die Intensität und Dauer der Niederschläge sowie Flutwellen aus höher gelegenen Einzugsgebieten und Eisstaus zu erwähnen. Dazu kommt es, wenn Eisblöcke in Flüssen während des Winters das Abfließen von Schmelzwasser verhindern, das sich als Folge von Warmluftzufuhr im Einzugsgebiet gebildet hat.

Die Analyse der 500-jährigen Zeitreihen aus den Einzugsgebieten der Flüsse Rhein, Main und Elbe ergab eine Häufung der Überschwemmungsereignisse um 1520, vor 1700, um 1850 und nach 1930. Der als Maunder-Minimum bezeichnete Zeitraum von 1645 bis 1715 findet auch immer wieder besondere Beachtung, weil damals die Zahl der Sonnenflecken und damit die Aktivität der Sonne geringer war. Perioden mit relativ wenig Fluten wurden dagegen zwischen 1720 und 1780, zwischen 1880 und 1930 und teilweise von 1950 bis 1990 beobachtet. Im 20. Jahrhundert konnte einzig für das Einzugsgebiet des Rheins eine signifikante Zunahme von Überschwemmungen nachgewiesen werden. Die Einzugsgebiete von Elbe und Main zeigen aufgrund der verfügbaren Beobachtungen keinen signifikanten Trend.

Veränderte Zirkulation der Atmosphäre

Sozioökonomische und politische Folgen

Die am Projekt beteiligten Sozialwissenschaftler haben klar aufgezeigt, dass die Gesellschaft klimamologisch längerfristig in erster Linie Extremereignisse wahrnimmt. Die sozioökonomische Analyse von historischen Überschwemmungen konzentrierte sich deshalb im Rahmen von Floodrisk auf katastrophale Ereignisse der schwersten Klasse wie jenes vom Winter 1784. Sie zeigte, dass während oder kurz nach einem Hochwasser nebst der Zerstörung von Gebäuden und Infrastruktur vor allem die Nahrungsmittelproduktion betroffen war. Versorgungsengpässe für Menschen und Tiere waren die Folge. Die politischen Organe waren gezwungen, mehr oder weniger effizient das Alltagsleben wieder in Gang zu bringen, während die betroffene Bevölkerung verunsichert und orientierungslos war und nach Informationen verlangte. Als erste Massnahme müssen die politischen Organe daher verhindern, dass ein gesellschaftliches Chaos entsteht. Die betroffene Bevölkerung braucht zudem schnell Informationen, wie die Katastrophe entstanden ist.

Wie der Berner Klimahistoriker Christian Pfister gezeigt hat, trugen die Häufung von Hochwassern in der Schweiz zwischen 1830 und 1880 und die in der Folge durchgeführten Sammlungen für die Betroffenen aber auch zur Stärkung der nationalen Identität bei, die um 1800 noch nicht stark ausgebildet war. Auch die Jahrtausendflut an Elbe und Donau im Jahr 2002, 13 Jahre nach der Wende, diente den politischen Behörden wie bei der Oderflut von 1997 dazu, das Gefühl des wiedervereinigten Deutschland zu stärken.

Obwohl während und nach einem Hochwasser Angst und Hoffnungslosigkeit dominieren, sind sich die Historiker darin einig, dass in der Regel schnell der Wille zur Verhütung vor möglichen zukünftigen Überschwemmungen entsteht. Im Nachgang von Flutkatastrophen kommen neue, innovative und teils unkonventionelle Präventionsmassnahmen umgesetzt werden. So ermöglichten Überschwemmungen, aber auch Feuersbrünste in den Städten vor 1800 Verbesserungen in der Verwaltung, in der Gesetzgebung, aber auch bei der Risikovorbeugung und der Stadtplanung. Fallstudien zeigen, dass

schon Quellen und klassierten, modernen Abflussmessungen das Ausmass der Fluten abgeschätzt werden. Zuvor waren in einem separaten Projekt des Berner Forschungsteams von Jürg Luterbacher mit Hilfe von indirekten Quellen wie Wetterbeschreibungen, Meeresverteilung, Baumringdaten oder frühesten instrumentellen Messungen die monatlichen Luftdruck- und Niederschlagskarten über Europa rekonstruiert worden. Damit konnten auch die einzelnen Wettermuster der grossen Überschwemmungen analysiert werden.

neben der Unterstützung durch die politischen Organe auch Medienkampagnen zugunsten der betroffenen Bevölkerung sehr erfolgreich waren. Ein gutes Katastrophenmanagement, eingesetzt und unterstützt durch die politischen Autoritäten, kann wesentlich zur nationalen Integration beitragen.

Offene Fragen und Hypothesen

Auch am Schluss dieser Studie gab es aber noch offene Fragen und wieder neue Hypothesen. Obschon von verschiedenen Experten betont wurde, dass Landnutzungsänderungen und Flusskorrekturen im Vergleich zur atmosphärischen Komponente eine weniger bedeutende Rolle spielen, ist dieser Faktor in Zukunft noch genauer zu untersuchen. Zudem haben die Zirkulationsstudien erneut ein Beispiel dafür geliefert, wie schwierig die Diagnose derart komplexer Prozesse ist, bei welchen in Raum und Zeit immer wieder andere Faktoren dominieren. Vor etwa 1820 dürften solare Aktivitätsschwankungen und Vulkanereignisse einen wichtigen Einfluss auf die Atmosphärenzirkulation ausgeübt haben. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts stellt sich dann zunehmend die Frage nach der Auswirkung menschgemachter Veränderungen, seien es solche an der Erdoberfläche oder bei den atmosphärischen Spurenstoffen (insbesondere Treibhausgas und Aerosole). Schliesslich muss auf die mögliche Rolle zufallsbedingter oder menschengemachter Veränderungen im Bereich der Ozeane, in erster Linie der Ozeanzirkulation und der Oberflächentemperaturen, hingewiesen werden, denn Ozeanspielen als Quellgebiete der kontinentalen Niederschläge eine entscheidende Rolle.

Literatur: Wanner, Heinz und Koatzen (2004): Dynamic and socioeconomic aspects of historical floods in Central Europe. *Erdkunde* 58 (1), 1-16 (2004).

Das unterschätzte Wurzelwerk der Bäume

Ein weiterer Faktor für die Kohlenstoff-Bilanz der Wälder

Von Ivano Brunner*

Der Waldboden ist für die Wissenschaft immer

nächsten Weisstanne vorgedrungen waren – und

Enorme Folgekosten

Letzten Sommer kamen die Überschwemmungsbilder nun nicht aus Europa, sondern aus den Monsungebieten Bangladeshs und Chinas und aus den Einzugsgebieten der Hurrikane in der Karibik. In der Schweiz näherten sich im Frühling die Seespiegel der Alpenrandseen jedoch bedrohlich dem Katastrophenpegel und fliessen Erinnerungen an 1999 wach werden, als der Thunersee und im weiteren Verlauf die Aare der Berner Mattequartier über die Ufer traten. Mehrere verheerende Überschwemmungen suchten allein in jüngster Vergangenheit auch die Gebiete am Rhein und Mosel (Dezember 1993 und Januar 1995), die Oder (Juli 1997 und 2001) sowie um Elbe und Donau (August 2002) heim. Diese Ereignisse werfen die Frage auf, ob sie die Folgen der normalen Variabilität des Klimas und eines natürlichen Klimawandels sind oder ob sie gar bereits auf menschliche Aktivitäten und Einflüsse auf das Klimasystem zurückzuführen sind.

Klar ist, dass die Folgekosten enorm sind: Allein die Jahrtausendflut von 2002 dürfte in Zentraleuropa zu Schäden von über 25 Milliarden Euro geführt haben. Weltweit besagen Schätzungen, dass Überschwemmungen in den letzten zehn Jahren über 250 Milliarden Dollar gekostet haben. Die Folgen sind jedoch nicht nur finanzieller Art. Auch die Unterbrechung eines geordneten Lebens, kollektiver Stress und Angst kämen dazu, schreibt der amerikanische Soziologe Kai Erikson. Somit stehen Naturkatastrophen rasch oben auf der politischen Traktandenliste.

Periodisches Auftreten

Die Ursachen und Abläufe zu kennen, die zu katastrophalen Überschwemmungen führen, sind nicht nur für die Direktbetroffenen und die politischen Behörden wichtig, auch die Wissenschaft hätte gerne Antworten auf diese Fragen. Diesem Ziel diente auch das interdisziplinäre europäische Projekt Floodrisk (Flood Frequency Analysis and Public Risk Management in a Historical Perspective). In dem vom Schweizer Nationalfonds unterstützten europäischen Projekt analysierten während vier Jahren mehrere Forschungsgruppen die Flutkatastrophen der vergangenen 500 Jahre.

Für die Arbeiten von Floodrisk wurden erstmals und systematisch zwei Datentypen miteinander verbunden: Die Abflussmessungen des 19. und 20. Jahrhunderts wurden mit historischen Dokumenten aus der Zeit vor 1800 ergänzt, für die noch keine systematischen Messungen vorlie-

gen bilden wichtige Voraussetzungen. Auf der Seite der Auslösefaktoren sind die Intensität und Dauer der Niederschläge sowie Flutwellen aus höher gelegenen Einzugsgebieten und Eisstaus zu erwähnen. Dazu kommt es, wenn Eisblöcke in Flüssen während des Winters das Abfliessen von Schmelzwasser verhindern, das sich als Folge von Warmluftzufuhr im Einzugsgebiet gebildet hat.

Die Analyse der 500-jährigen Zeitreihen aus den Einzugsgebieten der Flüsse Rhein, Main und Elbe ergab eine Häufung der Überschwemmungsergebnisse um 1520, vor 1700, um 1850 und nach 1930. Der als Maunder-Minimum bezeichnete Zeitraum von 1645 bis 1715 findet auch immer wieder besondere Beachtung, weil damals die Zahl der Sonnenflecken und damit die Aktivität der Sonne geringer war. Perioden mit relativ wenig Fluten wurden dagegen zwischen 1720 und 1780, zwischen 1880 und 1930 und teilweise von 1950 bis 1990 beobachtet. Im 20. Jahrhundert konnte einzig für das Einzugsgebiet des Rheins eine signifikante Zunahme von Überschwemmungen nachgewiesen werden. Die Einzugsgebiete von Elbe und Main zeigen aufgrund der verfügbaren Beobachtungen keinen signifikanten Trend.

Veränderte Zirkulation der Atmosphäre

Bei der Analyse möglicher Ursachen konnten Fragen von Landnutzungsänderungen und Flusskorrekturen nur bedingt einbezogen werden. Neben den Überschwemmungstatistiken standen räumlich hoch aufgelöste Rekonstruktionen der Monatsmittel von Bodendruck und Niederschlag im Vordergrund. Dabei liessen sich die Einzelereignisse aus den Flusseinzugsgebieten von Main, Rhein und Elbe in drei charakteristische Gruppen gliedern: Flachdrucklagen mit Gewitter im Sommer, lang anhaltende Westwetterlagen in der Zeit vom Frühling bis in den Herbst mit einer Südwärtsverlagerung der Zugstrassen der Tiefdruckgebiete bis in den Mittelmeerraum (Beispiel: Elbe 2002) sowie anhaltende Westwetterlagen mit Schneeschmelzen im Winter. In all diesen Fällen spielt der Feuchteimport von den ozeanischen Quellen auf das Festland die entscheidende Rolle.

Aufgrund der Datenlage musste man sich auf das Winterhalbjahr beschränken. Dabei zeigte sich, dass in der Zeit vor 1800 vor allem markant ausgeprägte Westlagen (Tief westlich von England) mit Warmluftzufuhr und Schneeschmelze zu Katastrophen führten. Zum Teil zogen die Tiefdruckgebiete über eine in der Meteorologie bekannte Zugstrasse (5b) in den Mittelmeerraum, wodurch warme Luft aus dem Adriaum in Richtung Nordwest geführt wurde und auf zum Teil gestaute kalte Luft im Norden zu liegen kam.

Im erwähnten Maunder-Minimum mit reduzierter Sonnenaktivität und sehr tiefen Winter-

an Elbe und Donau im Jahr 2002, 13 Jahre nach der Wende, diente den politischen Behörden wie bei der Oderflut von 1997 dazu, das Gefühl des wiedervereinigten Deutschlands zu stärken.

Obwohl während und nach einem Hochwasser Angst und Hoffnungslosigkeit dominieren, sind sich die Historiker darin einig, dass in der Regel schnell der Wille zur Verhütung vor möglichen zukünftigen Überschwemmungen entsteht. Im Nachgang von Flutkatastrophen konnten neue, innovative und teils unkonventionelle Präventionsmassnahmen umgesetzt werden. So ermöglichten Überschwemmungen, aber auch Feuersbrünste in den Städten vor 1800 Verbesserungen in der Verwaltung, in der Gesetzgebung, aber auch bei der Risikovorbeugung und der Stadtplanung. Fallstudien zeigen, dass

Das unterschätzte Wurzelwerk der Bäume

Ein weiterer Faktor für die Kohlenstoff-Bilanz der Wälder

Von Ivano Brunner*

Der Waldboden ist für die Wissenschaft immer noch ein Buch mit sieben Siegeln. Wie gross sind etwa die Feinwurzelsysteme der Bäume? Wie weit reichen sie, und wie gross ist das von ihnen beeinflusste Areal? Die Beantwortung solcher Fragen scheiterte bisher daran, dass sich Feinwurzeln im Waldboden praktisch nicht verfolgen lassen. In den obersten Bodenschichten finden sich in einem Quader von vier Zentimetern Kantenlänge und einem Zentimeter Dicke bis zu dreissig stark verzweigte Wurzelstückchen. In einem Weisstannenbestand in Vordemwald im Kanton Aargau ist es unserem Team der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in Birmensdorf jetzt erstmals gelungen, solche Feinwurzeln mit Hilfe molekulargenetischer Methoden einem bestimmten Baum zuzuordnen.¹

Mit zwei charakteristischen Markern im Erbgut, sogenannten Mikrosatelliten, konnten wir Weisstannenindividuen so charakterisieren, dass diese sich von den umliegenden Individuen deutlich unterscheiden liessen. Anschliessend wiesen wir einer Weisstanne alle ihr zugehörigen Feinwurzelpollen zu. Dabei stellte sich heraus, dass die Länge der Feinwurzeln der untersuchten Weisstanne hochgerechnet insgesamt rund 130 Kilometer betrug. Zudem konnten wir zeigen, dass sich die Feinwurzeln wider Erwarten weit über den Kronendurchmesser des Baumes hinaus ausgebreitet hatten und sogar bis zum Stamm der

* Ivano Brunner ist Biologe an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.

revolventen solare Aktivitätsschwankungen und Vulkanereignisse einen wichtigen Einfluss auf die Atmosphärenzirkulation ausgeübt haben. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts stellt sich dann zunehmend die Frage nach der Auswirkung menschgemachter Veränderungen, seien es solche an der Erdoberfläche oder bei den atmosphärischen Spurenstoffen (insbesondere Treibhausgase und Aerosole). Schliesslich muss auf die mögliche Rolle zufallsbedingter oder menschengemachter Veränderungen im Bereich der Ozeane, in erster Linie der Ozeanzirkulation und der Oberflächen-temperaturen, hingewiesen werden, denn Ozeane spielen als Quellgebiete der kontinentalen Niederschläge eine entscheidende Rolle.

Literatur: Wanner, Heinz und Kouatoron (2004): Dynamic and socioeconomic aspects of historical floods in Central Europe. *Erdkunde* 58 (1), 1–16 (2004).

nächsten Weisstanne vorgedrungen waren – und umgekehrt. In Stammnähe betrug der Eigenwurzelaanteil nur rund 60 Prozent, wobei die Zahl der «fremden» Feinwurzeln mit zunehmender Bodentiefe abnahm. Insgesamt lagern im Oberboden – er reicht bis in eine Tiefe von etwa 25 Zentimetern und ist besonders dicht mit Feinwurzeln durchwachsen – schätzungsweise 3,4 Tonnen Feinwurzeln (Trockengewicht) pro Hektare.

Auf die gesamte Biomasse bezogen machen die Feinwurzeln zwar nur etwa zwei Prozent des Kohlenstoffs in Schweizer Waldböden aus. Da die Feinwurzeln relativ kurzlebig sind – bei Nadelbäumen beträgt die mittlere Lebensdauer etwa fünf Jahre, bei Laubbäumen nur rund zwei Jahre –, spielen sie aber trotzdem eine wichtige Rolle bei der Kohlenstoff-Bilanz der Böden. Für die Anreicherung von Waldgebieten als CO₂-Senke, wie es das Kyoto-Protokoll vorschlösst, müssen ober- wie auch unterirdische Kohlenstoff-Pools und deren Veränderungen möglichst zuverlässig abgeschätzt werden. In der Schweiz hapert es aber noch mit der Genauigkeit dieser Schätzungen. Das liegt zum einen an der ungenügenden Anzahl von Stichprobenpunkten und zum anderen an der Tatsache, dass Bodendichte und Skelettanteil – also der Anteil von Steinen und Geröll – bisher nur geschätzt wurden. Um hier zu genaueren Resultaten zu kommen, braucht es auch verbesserte Methoden zur Erfassung der Wurzelbiomasse und bessere Kenntnisse bezüglich der Lebensdauer der Feinwurzeln.

¹ Molecular Ecology 13, 3595–3600 (2004).